Nicht für den Austausch

Aus dem Physikalischen Institut der Universität Breslau

Untersuchungen über die Sondenmeßmethode im Kohlebogen bei Atmosphärendruck

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Schlesischen
Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Breslau

vorgelegt von

Martin Arndt
aus Dittmannsdorf

1939

Breslauer Genossenschafts-Buchdruckerei, e. G. m. b. H., Breslau 1, Ursulinerstr. 1

Gedruckt mit Genehmigung der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Breslau

Referent: Prof. Dr. Cl. Schaefer
Korreferent: Prof. Dr. E. Fues

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Vorliegende Arbeit erscheint gleichzeitig in der Zeitschrift „Annalen der Physik"
5. Folge · Bd. 33 · Heft 6 · 1938

Meinen Eltern in Dankbarkeit

Untersuchungen über die Sondenmeßmethode im Kohlebogen bei Atmosphärendruck

Von Conrad von Fragstein und Martin Arndt

(Mit 16 Abbildungen)

Sonderabdruck aus ***Annalen der Physik*** *5. Folge · Bd. 33 · Heft 6 · 1938*
VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH IN LEIPZIG
Printed in Germany

§ 1. Einleitung

Die Sondenmethode zur Untersuchung von Gasentladungen besteht darin, daß man einen Leiter in die Entladung einführt und Spannung und Strom dieses Leiters gegen eine der Elektroden mißt. Aus diesen Messungen lassen sich dann gewisse Schlüsse auf die die Entladung bestimmenden Größen ziehen (Potential, Elektronentemperatur usw.). Diese Methode hat vor anderen den Vorzug, daß sie am ehesten gestattet, die Untersuchung auf einen bestimmten Punkt der Entladung zu lokalisieren. Sie hat dagegen den Nachteil (etwa gegenüber optischen Methoden), nicht rückwirkungsfrei zu sein. Diese Rückwirkung muß also vor allem diskutiert werden.

Die Brauchbarkeit der Sondenmethode zur Untersuchung von Niederdruckentladungen ist erwiesen durch die grundlegenden Untersuchungen von Langmuir[1]). Will man etwa das Potential der Entladung an einem bestimmten Punkt messen, so kommt man, wie Langmuir gezeigt hat, zu einem falschen Wert, wenn man eine gegen die Elektroden isolierte Sonde an diesen Punkt bringt und das Potential, das sie durch Aufladung mit Ladungsträgern erhält, mißt. Man muß vielmehr mit einer stromführenden Sonde arbeiten, indem man diese über eine geeignete Spannungsquelle mit einer Elektrode verbindet. Der von der Sonde aus der Entladung aufgenommene Strom, der „Sondenstrom", ist abhängig von der Größe der angelegten Spannung. Diese Abhängigkeit wird durch eine charakteristische Funktion oder Kurve dargestellt, die man als Sondencharakteristik bezeichnet. Aus dieser Charakteristik läßt sich dann nicht nur das Potential der Entladung an dem betreffenden Punkte, das sogenannte „Raumpotential", ermitteln, sondern auch noch eine Reihe anderer Größen wie Elektronentemperatur und Trägerkonzentration.

---

1) I. Langmuir u. H. Mott-Smith, Gen. El. Rev. **27**. S. 449, 538, 616, 762, 810. 1924.

Es ist indessen nicht möglich, diese Methode unverändert auf Entladungen bei hohen Drucken zu übertragen: zum ersten hat die Langmuirsche Theorie als notwendige Voraussetzung die Annahme, daß die Dicke der sich um die Sonde ausbildenden Raumladungszone klein ist gegenüber der mittleren, freien Weglänge der Elektronen. Diese Bedingung ist nur bei Niederdruckentladungen, nicht aber bei Hochdruckentladungen erfüllt. Deswegen ist die Gültigkeit der unveränderten Langmuirschen Theorie bei Entladungen unter hohem Druck (Atmosphärendruck) schon aus diesem Grund in Frage gestellt. — Zweitens ergeben sich Schwierigkeiten bezüglich der Messung: in der zu untersuchenden Hochdruckbogenentladung ist die Gastemperatur so hoch, daß man die Sonde nicht mehr stationär in die Entladung einführen kann, ohne daß sie sofort zerstört wird. Man vermeidet das, indem man nach Nottingham[1]) die Sonde mit hinreichender Geschwindigkeit durch den Bogen hindurchführt, zweckmäßig in einer zur Achse der Entladung senkrechten Ebene. Wählt man eine Zylindersonde, die länger ist als der Bogendurchmesser, so bestreicht man damit einen zylindrischen Abschnitt des Bogens. Bei diesem Verfahren tritt der Sondenstrom als kurzzeitiger Stromstoß auf. Man kann ihn daher nur messen mit einem Instrument bekannter oder verschwindender Trägheit, also etwa einem ballistischen Galvanometer oder einem Oszillographen. Für die Messungen der vorliegenden Arbeit wurde ein Schleifenoszillograph, Fabrikat Siemens-Halske, benutzt. — Drittens stört die Einbringung bzw. das Durchschlagen der Sonde die Hochdruckentladung in viel einschneidenderer Weise als die Niederdruckentladung. Die besondere Art der Störung muß also genau untersucht und in Rechnung gestellt werden. In der vorliegenden Arbeit wurde dieser Einfluß vorwiegend studiert. Die Abänderung der Langmuirschen Theorie für die Bedingungen der Hochdruckentladung muß dabei zunächst nur Programmpunkt bleiben, da die große Zahl der Elementarprozesse und das Fehlen von Symmetriebedingungen um die Sonde eine exakte theoretische Formulierung sehr erschweren.

§ 2. Apparatur

Die Apparatur bestand aus der Bogenlampe, dem Sondenbewegungsmechanismus und der Meßeinrichtung (Schleifenoszillograph und elektrische Meßinstrumente). Die Bogenlampe wurde so konstruiert, daß der Bogen vertikal brannte, um eine Deformation des Bogens durch Luftströmungen möglichst auszuschalten. Im Augenblick des Einschaltens des Bogenstromes wurden die Elektroden durch einen Magneten auf konstanten Abstand auseinander gezogen. Es gelang so, die Einbrennzeit des Bogens gut zu definieren und konstant zu

1) W. B. Nottingham, Journ. of the Franklin Institute **206**. S. 43. 1928.

halten. Die Elektroden und die zwischen ihnen befindliche Sonde wurden mit Hilfe einer kleinen Projektionseinrichtung auf einen Schirm mit Skala vergrößert abgebildet, um den Abstand der Elektroden voneinander und von der Sonde (gemessen in Richtung der Bogenachse) genau bestimmen zu können. Die Sonde mit ihrem Halter war um eine vertikale Achse schwenkbar. Die drahtförmige Sonde selbst lag dabei horizontal. Die Drehachse war über eine magnetisch betätigte Kupplung mit einem ruhig laufenden Motor verbunden, dessen Geschwindigkeit sich in hinreichend weiten Grenzen regeln ließ. Die Kupplung ließ sich wahlweise durch einen besonderen Kontakt oder den Auslöseschalter des Oszillographen betätigen, um bei konstant laufendem Motor die Sonde zu einem beliebigen Zeitpunkt durch den Bogen führen zu können. Der Sondenhalter war außerdem durch eine Feinverstellung parallel zur Bogenachse verschiebbar, da an verschiedenen Stellen des Bogens gemessen werden sollte. Als Sonden dienten im allgemeinen Platindrähte verschiedener Dicke; sie waren einzeln oder zu mehreren nebeneinander an einem Bügel aus anderem Material befestigt. Die Mehrfachsonden ermöglichten Vergleichsaufnahmen bei genau gleichem Zustand des Bogens. Um den Einfluß der Temperatur bestimmen zu können, wurden einige Sonden so eingerichtet, daß sie elektrisch geheizt werden konnten.

§ 3. Meßmethode

Die Messungen wurden an einem frei brennenden Kohlebogen von 4 mm Länge gemacht. Die Elektroden waren beide Homogenkohlen von 5 mm Durchmesser, Fabrikat Siemens Plania A. Die Kathode befand sich oben. Der Bogen brannte mit 4,8 Amp. und etwa 60 Volt. Die Spannung der speisenden Akkumulatorenbatterie betrug etwa 120 Volt. Zum Vergleich mehrerer Einzelmessungen wurde auf gleichen Strom unmittelbar vor der Sondendurchführung eingestellt, da sich dieses Kriterium als das schärfste zur Reproduzierung eines bestimmten Zustandes des Bogens erwies. Als Sonden wurden Drähte von 2 cm Länge, in der Dicke von 0,05—0,6 mm Durchmesser verwendet, meist von 0,3 mm Durchmesser. Als Material diente im allgemeinen Platin. Einige Messungen wurden auch mit Iridium- und Wolframsonden gemacht. Bei der Wahl des Materials sind zwei Gesichtspunkte maßgebend. Erstens muß es wegen der hohen Temperatur des Bogens schwer schmelzbar sein. Zweitens muß es wegen der Anwesenheit des Luftsauerstoffs auch im Glühzustande chemisch widerstandsfähig sein. Wolfram genügt zwar der ersten Forderung weitestgehend (Schmelzpunkt 3300°), nicht aber der zweiten. Bei stärkerer Erhitzung verändert sich durch Oxydation die Oberfläche und schließlich auch die Dicke des Drahtes. Aus dem gleichen Grunde mußte auch Kohle ausscheiden. Iridium erfüllt beide Bedingungen gut (Schmelzpunkt 2400°), läßt sich aber leider nur schlecht bearbeiten. Es war nur als ungleichmäßiger Walzdraht von etwa 0,5 mm Durchmesser zu erhalten. So blieb als bestgeeignetes Material Platin übrig, das die zweite Forderung ideal,

die erste noch hinreichend erfüllt (Schmelzpunkt 1780°). Der Abstand zwischen der Achse des Bogens und der Achse, um die der Sondenhalter mit Sonde geschwenkt wurde, betrug 8 cm. Man kann den Weg der Sonde durch den Bogen (über einen Winkel von etwa 6°), mit hinreichender Genauigkeit als geradlinig annehmen. Die Tourenzahl des bewegenden Motors war so regelbar, daß sich die lineare Geschwindigkeit der Sonde in den Grenzen von 10—80 cm/sec verändern ließ. Im allgemeinen wurde eine mittlere Geschwindigkeit verwendet. Bramhall[1]) gibt 13 cm/sec an, Nottingham[2]) 60 cm/sec; es geht jedoch aus der letztgenannten Arbeit nicht hervor, ob *nur* diese Geschwindigkeit benutzt wurde. Es ist für die Auswertung der Messungen wesentlich, die Bogenlänge genau zu kennen und sie außerdem bei Vergleichsmessungen genau gleich zu halten, und zwar beides im Augenblick der Sondendurchführung. Diese Forderungen sind wegen des Abbrandes der Kohle nicht streng zu erfüllen. Um sie aber hinreichend genau befriedigen zu können, hat man zwei Möglichkeiten: entweder man führt die Sonde unmittelbar nach dem Zünden des Bogens hindurch; dann kann man mit dem vor dem Zünden eingestellten Wert auch noch als Elektrodenabstand während der Durchführung rechnen. Dieses Verfahren scheint für den Metallbogen gut brauchbar zu sein[3]). Der Kohlebogen aber ist in diesem Zustand, also kurz nach dem Zünden, so instabil, daß die gemessenen Sondenstromwerte um 100% und mehr streuen. Man muß also den Bogen erst eine Zeitlang einbrennen lassen, bis sich ein Gleichgewichtszustand hergestellt hat. Etwa 8 Sekunden erwiesen sich als günstigste Zeit. — Bei wesentlich kürzeren Zeiten ist der Bogenstrom noch im Ansteigen, bei längeren geht er infolge der Bogenverlängerung durch Abbrand der Elektroden wieder zurück.

Nach 8 Sekunden ist schon ein merklicher Abbrand vorhanden (etwa 0,15 mm). Man kann aber den Elektrodenabstand genügend genau bestimmen, wenn man den Bogen unmittelbar nach der Sondendurchführung löscht und dann den Elektrodenabstand mißt. Um mehrere Messungen einander zuordnen zu können, muß man noch den Abbrand während der Einbrennzeit kennen und diese konstant halten, um dem in der Anfangseinstellung der Elektroden Rechnung tragen zu können. Dieses Verfahren wurde hier angewendet. Als Spannungsquelle für das Sondenpotential diente anfänglich eine Trockenbatterie. Es zeigte sich aber bald, daß deren innerer Widerstand, namentlich nach einigem Lagern, viel zu hoch war, um einwand-

1) E. H. Bramhall, Phil. Mag. XIII. S. 682. 1932.
2) W. B. Nottingham, a. a. O.
3) E. H. Bramhall, a. a. O.

freie Messungen zu ermöglichen. Deshalb wurde die Sondenspannung später aus einem Potentiometer entnommen, das an der den Bogen speisenden Batterie lag, endlich aus einer zellenweise abgreifbaren, getrennten Akkumulatorenbatterie, die für höhere Spannungen mit dem Potentiometer kombiniert wurde, da aus der Batterie nur 40 Volt zur Verfügung standen. Die Schaltung ist in Abb. 1 skizziert.

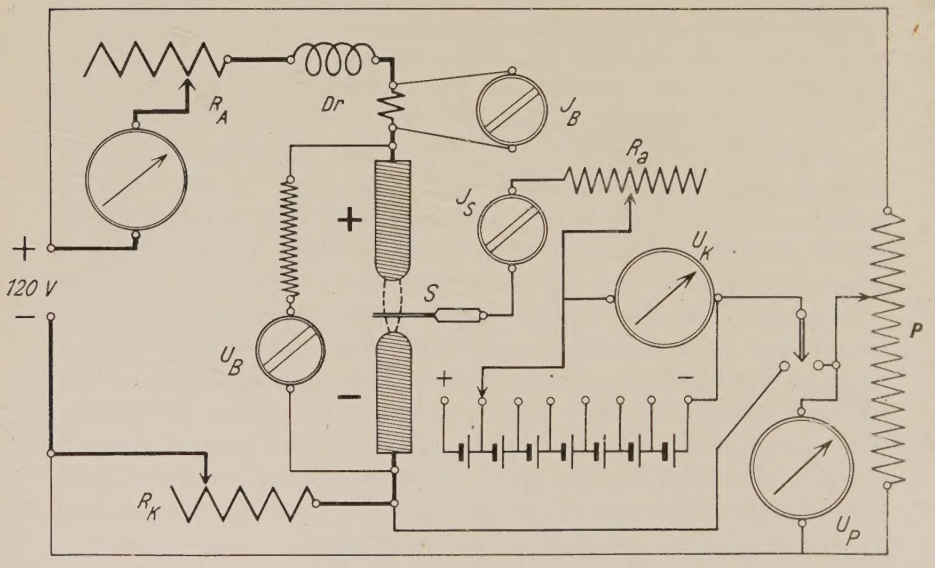

Abb. 1. Schaltanordnung

Man erkennt links den stark gezeichneten Bogenstromkreis. Der Strom geht von der Batterie 120 Volt über ein Amperemeter und den regelbaren Vorschaltwiderstand R_A, die Stabilisierungsdrossel Dr und den Shunt der Stromschleife I_B zur Anode; von der Kathode über einen zweiten Vorschaltwiderstand (vgl. dazu § 4) zurück zur Batterie. Parallel zum Bogen liegt die Spannungsmeßschleife mit ihrem Vorschaltwiderstand. Anderseits geht der Sondenstrom von der Sonde S über die Meßschleife I_S, den regelbaren Widerstand R_a und die abgreifbare Sondenspannungsbatterie (deren Spannung durch das Voltmeter U_K gemessen wird) zu dem rechts befindlichen Umschalter, über diesen entweder direkt zur Kathode (Schalterstellung links) oder über das Potentiometer P, mit dem Voltmeter U_P zur Bogenbatterie.

Einige Beispiele von Sondenstromkurven, die während der Durchführung der Sonde durch den Bogen aufgezeichnet wurden, sind in Abb. 2a—c dargestellt.

Die Gründe für das Zustandekommen der verschiedenen Typen der Sondenstromkurven werden in § 4 besprochen. Jeder Momentanwert des Sondenstromes ist einem bestimmten Punkt der Zeitachse und damit einer bestimmten Stellung der Sonde zum Bogen zugeordnet. Der Sondenstrom beginnt bei A,

wenn die Sonde in den Bogen eintritt, durchläuft ein Maximum[1]), das etwa dann erreicht wird, wenn die Sonde die Bogenachse schneidet, und hört bei *E* auf, wenn die Sonde den Bogen verläßt. Die Veränderung des Sondenstromes während des Durchganges ist nicht allein durch die Veränderung der Eintauchtiefe zu erklären, sondern auch noch durch die Inhomogenität des Bogens über seinen Querschnitt bedingt. Will man aus einzelnen Meßpunkten bei verschiedenen Sondenspannungen die Charakteristik gewinnen, so muß man Sondenstromwerte wählen, die stets der gleichen Lage der Sonde zum

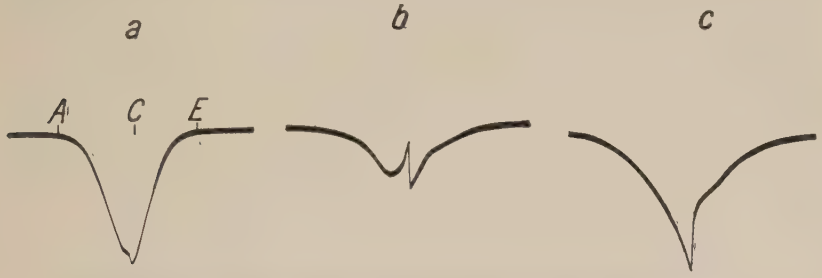

Abb. 2. Verschiedene Typen von Sondenstromoszillogrammen

Bogen entsprechen, also bei einem bestimmten Punkt der Zeitachse, etwa in festem Abstand von dem Augenblick des Eintauchens der Sonde. Da aber bei der steilen Form der Kurve eine kleine Ungenauigkeit der Abszisse eine erhebliche Änderung des Stromwertes zur Folge hat, und da außerdem der Eintauchpunkt nicht scharf markiert ist, so ist es besser, sich auf das spitze Maximum zu beziehen oder dieses selbst zu wählen. Durch Auswertung des Oszillogramms in dieser Weise erhält man dann das „Raumpotential“[2]) in einem bestimmten Punkt der Bogenachse. Verschiebt man bei dieser Art der Zuordnung die Sonde längs des Bogens, so mißt man damit den Potentialverlauf entlang der Bogenachse. Bei einer anderen Zuordnung würde man entsprechend entlang einer achsenparallelen Linie messen.

Bei der Kurvenform *c* bereitet die Zuordnung in der angegebenen Weise keine Schwierigkeit, wohl aber bei *b*, wo zwei im allgemeinen verschiedene Maxima auftreten. Es zeigt sich aber, daß es hier ausreicht, immer etwa den Stromwert des größten Maximums für die Aufzeichnung der Charakteristik zu benutzen.

Die Lage der Bogenelektroden und der Sonde ließ sich mit Hilfe der in § 2 erwähnten Projektionseinrichtung auf etwa 0,01—0,02 mm genau bestimmen. Mit der gleichen Genauigkeit ließ sich die Lage der Sonde und der Kathode bei den einzelnen Messungen konstant halten. Als Ort der Kathode wurde dabei stets der höchste Punkt ihrer schwach konvexen Oberfläche gemessen. Die Anode brennt nicht so regelmäßig ab, sondern zu einer in der Mitte leicht vertieften Fläche, die meist mehr oder weniger schief zur Bogenachse steht. Die anfangs recht große Unregelmäßigkeit ließ sich durch geeignete Vor-

1) Da der Sondenstrom ein Elektronenstrom ist, ist er in den reproduzierten Oszillogrammen (Abb. 2, 3, 4 u. 9) immer nach unten aufgetragen.

2) Wir bezeichnen mit Vorbehalt, wie es in den bisherigen Untersuchungen geschah, den Potentialwert am Knick der Sondencharakteristik als „Raumpotential“ und setzen ihn der Unsicherheit wegen in Anführungsstriche.

behandlung der Anode (Abfeilen nach jeder Messung) so weit einschränken, daß es gelang, die Schwankung der Bogenlänge in der Größe von etwa 1% zu halten. Es zeigte sich, daß der Sondenstrom wesentlich nur von dem Abstand Sonde–Kathode abhängt. Die Werte des Sondenstromes selbst streuen, je nach der verwendeten Anordnung um 2—5% der jeweiligen Stromgröße. Diese Streuung ist in der Hauptsache bedingt durch die Störung des Bogens beim Sondendurchgang. Diese Störung kann um Beträge bis zu 50% schwanken. Es gelang aber, durch eine Drossel im Bogenkreis diese Schwankung der Störung auf höchstens 10% zu beschränken. Das bedeutet dann, bezogen auf den gesamten Bogenstrom, nur etwa 2%, da die Gesamtstörung höchstens 20% des Bogenstromes ausmacht. (Mißt man ohne Drossel, was für einige Fälle notwendig ist, so muß man auch die Störung untersuchen und ihrer Schwankung in jedem einzelnen Falle durch eine Korrektur des Sondenstromes Rechnung tragen).

Im folgenden ist eine Übersicht über sämtliche gemessenen Größen sowie über die Art der Messung gegeben:

1. Abstand: Sondenachse–Kathode (d_K)
2. Abstand: Sondenachse–Anode (d_A)

} (gemessen an der Projektionsschirmskala).

3. Sondendurchmesser $(2r_S)$ (mit Mikrometerschraube).
4. Heizstromstärke in Ampere (I_H).
5. Bogenstrom in Ampere (I_B) (Wert vor der Sondendurchführung).
6. Bogenstrom in Ampere (I_B) (Momentanwert und Störung mit dem Oszillographen).
7. Bogenspannung in Volt (E_B) (Momentanwert mit dem Oszillographen).
8. Sondenstrom in Milliampere (I_S) (Momentanwert mit dem Oszillographen).
9. Sondenpotential gegen Kathode in Volt (U_S) (mit Voltmeter).
10. Sondendurchführungsgeschwindigkeit in cm/sec (v_S).
11. Papierablaufgeschwindigkeit des Oszillographen in cm/sec (v_p) (Tachometer oder Zeitschreiber).

Aus v_S, v_p und der Sondenstromkurve ist der Bogenquerschnitt an der betreffenden Stelle zu ermitteln.

12. Endlich wurde noch die Spannung der den Bogen speisenden Batterie (etwa 120 Volt) dauernd kontrolliert, um so den Bogenstrom möglichst konstant zu halten.

§ 4. Störung des Bogens und Kühlzone um die Sonde

Nach der Langmuirschen Theorie wird die Abhängigkeit des Sondenstromes von der Sondendicke, wenn die Sonde negativ gegenüber dem Raumpotential ist, ausgedrückt durch die Beziehung:

$$J_s = i_d \cdot F \cdot \varepsilon^{-\frac{eV}{kT}} = i_d \cdot l \cdot 2r\pi \cdot \varepsilon^{-\frac{eV}{kT}}.$$

Dabei bedeuten:

i_d = Diffusionsstromdichte der Elektronen im ungestörten Plasma,
F = Oberfläche der Sonde, l = Sondenlänge, r = Sondenradius,
ε = Basis der nat. Logarithmen,

k = Boltzmannsche Konstante,
V = Potential der Sonde gegenüber Plasma,
e = elektrische Elementarladung,
T = Temperatur der Elektronen.

Hält man die Lage der Sonde zum Bogen und das Sondenpotential konstant, d. h. l und V, so müßte der Sondenstrom direkt proportional zur Sondendicke sein. Die Messung des Sondenstroms in Abhängigkeit von der Sondendicke unter sonst gleichen Verhältnissen (gleiches Sondenpotential, gleiche Sondengeschwindigkeit) führt aber gerade zu dem entgegengesetzten Ergebnis: Der Sondenstrom wird

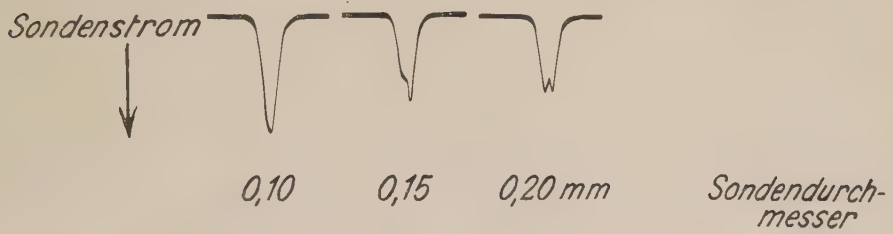

Abb. 3. Abnahme des Sondenstromes mit der Sondendicke

mit zunehmender Sondendicke kleiner. Dieser Umstand zeigt deutlich, daß die Bedingungen, denen eine Sonde in einem Hochdruckbogen unterworfen ist, völlig verschieden sind von denen einer in eine Niederdruckentladung eintauchenden Sonde. Als Erklärung für dieses abweichende Verhalten kommt vor allem eine Möglichkeit in Frage: Der Einfluß des Wärmeentzuges durch die Sonde. Die dickeren Sonden kühlen den Bogen stärker als die dünnen. Infolgedessen geht auch der von der Sonde aufgenommene Strom mit Vergrößerung des Sondenradius zurück, da sowohl die Trägerkonzentration als auch vor allem die mittlere, freie Weglänge in der Umgebung der Sonde verkleinert wird. Diese Kühlwirkung muß so stark sein, daß sie den normalerweise zu erwartenden Anstieg des Sondenstromes mit Vergrößerung der Sondenoberfläche völlig überdeckt. Diesen normalen Verlauf würde man wahrscheinlich erhalten, wenn man die Sondenströme bei verschiedenen Sondenradien aber bei gleicher Sondentemperatur vergleichen würde. Man müßte zu diesem Zweck die dünnen Sonden rascher durch den Bogen bewegen als die dicken. Da sich aber die Sondentemperaturen im Bogen nur mit einer gewissen Annäherung bestimmen ließen, und da anderseits die Sondenströme auf eine Temperaturveränderung der Sonde sehr empfindlich reagieren, so kann vorläufig kein verläßliches Material für diese Frage beigebracht werden. Erschwerend für

einen solchen Vergleich wäre auch noch der Umstand, daß die Störung im Fall der dicken Sonden größer ist und man daher immer in einem etwas anderen Bogenzustand messen würde.

Die durch die Sonde verursachte Störung wird in zwei Richtungen zu suchen sein: Erstens wird von der Sonde aus der Entladung Strom aufgenommen, und es werden damit Ladungsträger entzogen, was sich unmittelbar in der Strom- und Spannungsänderung an der Entladungsstrecke auswirkt. Zum zweiten wird das Einbringen der Sonde in die Entladung eine starke Kühlwirkung haben, was sich indirekt im Trägerhaushalt der positiven Säule z. B. durch Verschlechterung der Ionisierungsbedingungen und durch Verkleinerung der mittleren, freien Weglänge bemerkbar machen wird. Zur Untersuchung der Störung ist man zunächst angewiesen auf die Beobachtung der Spannungs- und Bogenstromänderung. Es wurden daher immer neben dem Sondenstrom auch Bogenstrom und Bogenspannung oszillographisch registriert. Abb. 4 zeigt ein solches Oszillogramm. In dem Zeitraum zwischen A und B geht die Sonde durch den Bogen und nimmt den durch die oberste Kurve gekennzeichneten Elektronenstrom auf. Außerhalb dieses Bereiches ist die Schleife I natürlich stromlos. Die Schleifen II und III zeigen außerhalb AB die Spannung (E_B) bzw. den Strom (I_B) des Bogens vor und nach der Messung an. (Die Linie IV dient als Nullmarke für E_B und I_B). Zwischen A und B zeigen die Schleifen II und III die Rückwirkung der Sonde auf den Bogen an. Man bemerkt zunächst den durch die negative Charakteristik des Bogens bedingten Verlauf: Der Strom sinkt, die Spannung steigt. Ferner ist der Rückgang des Bogenstromes weit größer als der gemessene Entzug

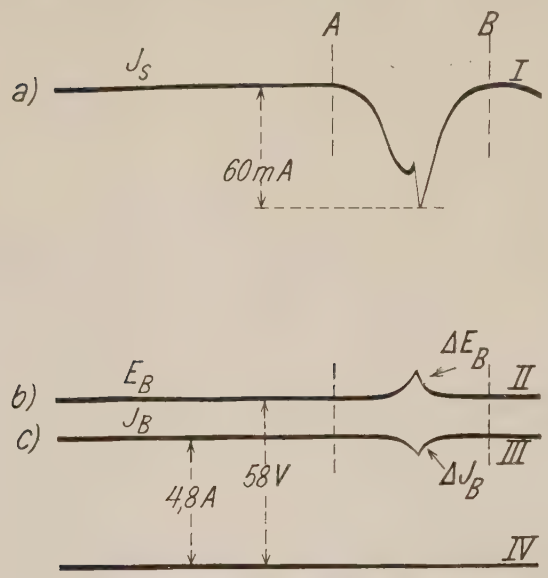

Abb. 4. Bogenstörung bei Sondendurchführung. a) Sondenstrom, b) Bogenspannung, c) Bogenstrom

durch die Sonde. Der Sondenstrom war selten größer als 100 mA, die Abnahme der Bogenstromstärke bewegte sich aber im allgemeinen zwischen 400—800 mA. Hierin drückt sich wieder aus, daß der Trägerentzug nicht die einzige und wichtigste Ursache der Störung ist.

Die am Bogen auftretende Spannungsänderung ist nicht direkt ein Maß für die Störung, sondern zeigt eher an, in welcher Weise der Bogen auf den primären Eingriff des Trägerentzuges, sei er direkt durch die Stromaufnahme der Sonde oder indirekt durch die Abkühlung des Bogens verursacht, reagiert. Das ist aber wesentlich abhängig von der Größe des Stabilisierungswiderstandes des Bogens und der antreibenden Klemmenspannung. Der stationäre Arbeitspunkt einer Bogenentladung (Abb. 5) ist gegeben durch den Schnittpunkt S der Widerstandsgeraden und der statischen Charakteristik. Wenn eine Störung dieser stabilen Brennbedingungen stattfindet, verursacht etwa durch einen stärkeren Trägerentzug, dann sinkt die Stromstärke und die Spannung am Bogen steigt derart an, daß sich der Arbeitspunkt auf der Widerstandsgeraden nach S' verschiebt. Die Steilheit der Widerstandsgeraden, d. h. die Größe des Stabilisierungswiderstandes bedingt den Betrag der Spannungsänderung. Man kann daher nicht ohne weiteres die Größe der Spannungsänderung als Maß für die Bogenstörung betrachten, da bei gleichem Trägerentzug ein größerer Stabilisierungswiderstand eine größere Spannungsstörung verursacht.

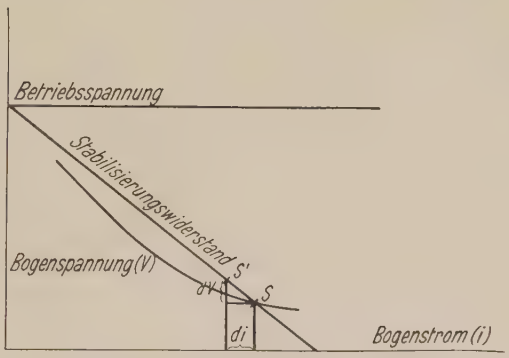

Abb. 5. Spannungs- und Stromänderung bei Bogenstörung (schematisch)

Wenn man allerdings bei konstant gehaltenem Stabilisierungswiderstand die Größe der Störung variiert, wie wir es durch Veränderung der Sondendicke getan haben, dann gibt die entsprechende Spannungsänderung tatsächlich ein Bild von der Störungszunahme. In Abb. 6a ist der Zusammenhang zwischen Störspannung und Sondendicke dargestellt. Abb. 6b zeigt die darauf bezüglichen Oszillogramme.

Die Behauptung, daß die durch die Sonde hervorgerufene Störung im wesentlichen eine Kühlwirkung ist, wird gestützt durch

folgende Tatsache: Die Größe der Störspannung, die wir mit gewissen Einschränkungen als Maß für die Störung ansehen können, ist in der in Abb. 6a dargestellten Weise von der Sondendicke abhängig. Sie ist aber nahezu unabhängig von dem an die Sonde gelegten Potential und damit von der Größe des Sondenstromes. Erst wenn die aufgenommenen Sondenströme beträchtlich werden, macht sich dies in einer geringfügigen Zunahme der Spannungsänderung bemerkbar.

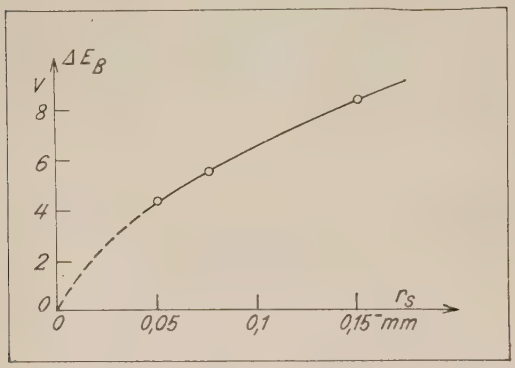

Abb. 6a. Spannungsstörung in Abhängigkeit vom Sondenradius

Um den Zusammenhang zwischen der Bogenstromstörung und der Spannungsstörung zu untersuchen, wurden die beiden Größen unter Verwendung einer Widerstandskondensatoranordnung mit größerer Genauigkeit aufgeschrieben: Bei der Anordnung, die dem Oszillogramm in Abb. 4 zugrunde liegt, wird durch die Schleife *III* der ganze Bogenstrom gemessen. Die zu messende Störung,

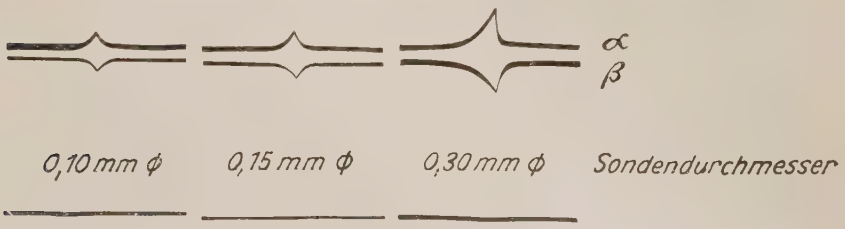

Abb. 6b. Störungsoszillogramme.
α) Bogenspannung, β) Bogenstrom

auf die es allein ankommt, beträgt nur etwa 10—20 % des Gesamtstroms. Da aber der Shunt für den ganzen Bogenstrom bemessen werden muß, so ist natürlich die Meßgenauigkeit für die Störung nicht ausreichend. Eine genauere Messung ist möglich, wenn man den Störungsanteil von dem Gleichstrom trennt. In Abb. 7a ist die angewandte Schaltung skizziert. Der Ohmsche Widerstand in der Abbildung stellt den Widerstand der Strom- bzw. Spannungsschleife dar. Die Schaltung mußte so bemessen sein, daß der Wechselstromwiderstand des Kondensators für das ganze in dem Störimpuls ent-

haltene Frequenzspektrum klein war gegenüber dem in Serie geschalteten Ohmschen Widerstand (Schleifenwiderstand). Aus der Breite des Störimpulses ergab sich eine Grundfrequenz $f_u \simeq 100$ Hz. Es gelangten Kapazitäten von 10000 μF zur Anwendung (Elektrolytblocks). Ihr Wechselwiderstand für f_u von $\sim \frac{1}{6}\ \Omega$ war klein

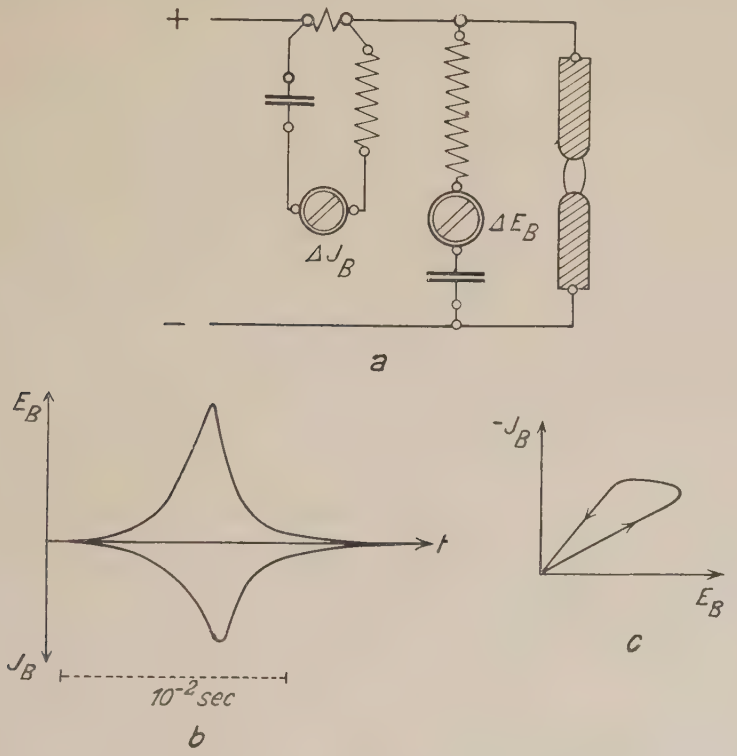

Abb. 7.
a) Schaltanordnung zur Untersuchung der Bogenstörung
b) zeitlicher Verlauf von Spannungs- und Bogenstromstörung
c) Zusammenhang zwischen Spannungs- und Stromstörung

gegenüber dem Schleifenwiderstand. Mit dieser Anordnung ließ sich die Meßgenauigkeit auf etwa das 5fache steigern. Das Analoge gilt für die Messung von ΔE_B. Ordnet man nun Strom und Spannungswerte der Störung in jedem Zeitpunkt einander zu, so ergibt sich die in Abb. 7c dargestellte Schleife, die deutlich die Hysterese des Bogens erkennen läßt. Liegt im Bogenstromkreis noch eine Drossel, was im allgemeinen zur Erreichung einer genügenden Stabilität der Anordnung notwendig war, so wird die resultierende Stromspannungsschleife weiter geöffnet. Abb. 7b gibt

die Spannungs- und Stromänderung, die durch die Sonde hervorgerufen wird, in Abhängigkeit von der Zeit wieder.

Die Wärmeverluste des Bogens lassen sich in einfacher Weise aus der Temperaturerhöhung der Sonde berechnen. In welcher Weise die Temperaturen der in dem Bogen befindlichen Sonde gemessen wurden, wird an späterer Stelle auseinandergesetzt werden (§ 6). Die der Sonde sekundlich zugeführte Energie in Watt ist gegeben durch den Ausdruck $\Delta U = \frac{C r_s^2 \pi l c \cdot s \Delta T}{\Delta t}$, wobei C das elektrische Wärmeäquivalent, r_s den Sondenradius, l die Sondenlänge, c die spezifische Wärme und s die Dichte von Platin, Δt die Verweilzeit der Sonde im Bogen und ΔT die Temperaturerhöhung bedeuten. Wenn man unter Δt speziell die Dauer der eigentlichen Störung, also des wesentlichen Energieentzugs versteht, wird der Wert der durch die Sonde dem Bogen entzogenen Leistung etwa um den Faktor 2—3 größer, da die Dauer der eigentlichen Störung (vgl. Abb. 4) nur $^1/_2$—$^1/_3$ der Verweilzeit der Sonde im Bogen ausmacht. Es ergibt sich somit für eine Sonde der Dicke von 0,3 mm und der Durchführungsgeschwindigkeit von 32 cm/sec ein mittlerer sekundlicher Energieentzug aus dem Bogen von etwa 8 Watt bzw. ein solcher von 16—24 Watt während der Dauer der eigentlichen Störung, wenn sich die Sonde im Bogenkern befindet. Wenn man bedenkt, daß die Gesamtleistung des Bogens nur 250 Watt beträgt, sieht man, in welch empfindlicher Weise der Bogen durch die Sonde gestört wird. Schon diese einfache Abschätzung zeigt also, daß in der Umgebung der Sonde das Bogengas ganz beträchtlich abgekühlt werden muß und daß man daher auf keinen Fall mit denjenigen Verhältnissen rechnen kann, die nach der Langmuirschen Theorie in der Umgebung von Sonden bei Niederdruckentladungen auftreten. Die Existenz einer Kühlzone ist von Mason[1]) experimentell nachgewiesen worden, der den Bogen, während sich die Sonde in ihm befand, photographierte. Auf seinen Aufnahmen ist deutlich in dem leuchtenden Bogengas um die Sonde herum eine dunkle Zone zu erkennen, deren Dicke er im Projektionsbild ausmessen konnte. In dieser Zone muß also die Temperatur bedeutend tiefer sein als in dem ungestörten Teil des Bogens, da in ihr keine wesentliche Ionisation stattfindet.

Dieser Wärmeverlust des Bogens läßt sich noch auf eine andere Weise veranschaulichen. Die in der Säule des Bogens umgesetzte Leistung wird im Falle eines frei brennenden Bogens größtenteils an die umgebenden kälteren Luftschichten, im Falle eines ab-

1) R. C. Mason, Phys. Rev. **51**. S. 28. 1937.

geschlossenen Bogens an die Glaswandung abgegeben. Wenn wir unter „Wand“ allgemein die Berührungsfläche zwischen Entladungssäule und Umgebung verstehen wollen, dann kann man die Größe der Wand als ein ungefähres Maß für die Größe der von der Säule abgegebenen Energie betrachten. Man kann sich nun die thermische Störwirkung der Sonde vorstellen als eine Vergrößerung der Wand. Und zwar ist diese zusätzliche Wand nicht durch die Oberfläche der Sonde gegeben, sondern durch die Oberfläche der Kühlzone, die den Störmechanismus von dem ungestörten Plasma trennt, genau wie die „Wand“ den ungestörten Bogen von dem dunklen Mantel trennt, durch den die Energie der Säule dem Außenraum mitgeteilt wird. Man kann also vermuten, daß sich — gleiche Energiestromdichte durch die „Wand“ vorausgesetzt — die Oberfläche der Kühlzone zum Bogenmantel verhält wie die Säulenleistung zur sekundlichen Energieaufnahme der Sonde, wenn sie sich im Bogen befindet. Die Säulenleistung (abzüglich der in Kathodenfall und Anodenfall umgesetzten Leistung, die bei unserer Betrachtung nicht ins Spiel kommt) betrug 83 Watt. Für den Leistungsentzug durch die Sonde setzten wir den Wert von 24 Watt, den die Sonde im Bogenkern verursacht. Die Länge des Bogens betrug 4 mm, der Durchmesser schätzungsweise 5 mm, damit ergab sich bei Anwendung der auseinandergesetzten Betrachtung für den Radius der Kühlzone ein Wert von 0,57 mm. Wenn wir damit einen Wert von $r = 0{,}4 - 0{,}56$ mm vergleichen, den Mason unter ähnlichen Versuchsbedingungen (0,25 mm starke Kupfersonde an Stelle der von uns verwendeten 0,3 mm starken Platinsonde) photographisch erhalten hat, so sieht man eine befriedigende Übereinstimmung.

Die primäre Störung durch die Sonde ist also eine thermische. Das Bogengas wird gekühlt und damit die Ladungsträgerdichte an der gestörten Stelle im Bogen herabgesetzt. Das hat eine lokale Heraufsetzung der Säulenfeldstärke zur Folge. Es ist nun die Frage, ob sich diese Verschiedenheit in den Feldstärken im gestörten und ungestörten Teil der Säule infolge der guten Leitfähigkeit des Plasmas rasch genug, d. h. während der Verweilzeit der Sonde im Bogen, ausgleicht oder nicht. Wir haben im folgenden einen raschen Ausgleich für wahrscheinlich gehalten und deshalb mit einer über die Länge der Säule konstanten Feldstärkenerhöhung während der Störung gerechnet. Selbstverständlich ist dies aber noch ein Punkt, der gründlich untersucht werden muß. Immerhin gestattet diese Annahme, ein auffälliges Verhalten der Sondenstromoszillogramme zu erklären. Je nach der Art der Schaltung des Sondenkreises zeigen die Oszillogramme ein ganz verschiedenartiges Aussehen. An

der Abb. 2b fällt die merkwürdige Aufspaltung in zwei Maxima, bzw. Einbuchtung an Stelle eines einzigen Maximums auf.

Einen Hinweis auf die Erklärung findet man, wenn man den Sondenstrom mit der Spannungsstörung in Beziehung setzt. Es zeigt sich nämlich, daß die Einsenkung immer genau mit dem Maximum der Störung zusammenfällt. Dazu kommen noch folgende Tatsachen: 1. Liegt der Vorschaltwiderstand des Bogens an der Anode (d. h. zwischen der Anode und dem +-Pol der Batterie, so daß die Kathode direkt mit dem −-Pol verbunden ist), und ist der Sondenkreis nach der Kathode hin geschlossen (Schaltschema Abb. 8a), so ist die Einbuchtung der Sondenstromkurve um so größer, in je größerem Abstand von der Kathode man die Sonde durchführt, am größten also in Anodennähe. 2. Liegt der Vorschaltwiderstand vor der Kathode (Abb. 8b) und ist der Sondenkreis wiederum nach dem −-Pol der bogenspeisenden Batterie geschlossen, so tritt überhaupt keine Einbuchtung der Sondenstromkurve auf, sondern stets eine einzige scharfe Spitze. Diese Verhältnisse werden durch folgende Annahme über den Zustand des Bogens erklärt, der in Abb. 8 schematisch dargestellt ist. Auf der Abszisse sind die Länge des Bogens und der Abstand der Sonde von der Kathode aufgetragen, auf der Ordinate die Spannungen gegen den −-Pol der Bogenbatterie. Dann wird durch die Kurve $KCDA$ grob schematisch der Verlauf des Potentials entlang der Achse des ungestörten Bogens angegeben, bestehend aus Kathodenfall KC, positiver Säule CD, die hier als von konstanter Feldstärke angesehen wird, und Anodenfall DA. Die Kathode hat das Potential 0, die Anode U_A = etwa 60 Volt. Die Spannungsdifferenz von der Anode bis zum +-Pol der Batterie (120 − 60 = 60 Volt) wird am Bogenvorschaltwiderstand vernichtet. Am Ort P (mit dem Abstand d_K von der Kathode befindet sich die Sonde S auf dem Potential U_S. Diese sei z. B. positiver als das Raumpotential U_P des Bogens an der Stelle P angenommen. Es wird also von der Sonde ein Elektronenstrom bestimmter Größe aufgenommen. Nun wird aber der Bogen durch das Eintauchen der Sonde gestört, und zwar um so mehr, je mehr sich die Sonde der Bogenachse nähert; die Spannung am Bogen wird vergrößert. Da das Potential der Kathode festliegt, so muß sich die ganze Störung als Erhöhung des Anodenpotentials auswirken, nämlich von U_A auf U_A' (etwa 10 Volt). Entsprechend wird der Spannungsabfall am Vorschaltwiderstand kleiner. Wie sich diese Potentialverschiebung dabei auf die Länge des Bogens verteilt, ist noch unbekannt. Wir nehmen versuchsweise an, daß die Größe von Kathoden- und Anodenfall unverändert bleiben und sich die ganze Spannungsstörung gleichmäßig auf die ganze positive Säule verteilt. Damit erhält man den in Abb. 8a durch die gestrichenen Buchstaben gekennzeichneten Verlauf $KCDA'$. An der Stelle des Bogens, wo sich die Sonde befindet, wird dann das Raumpotential um den Betrag $\Delta E_B \cdot \frac{d_K}{d_K + d_A}$ gehoben, also von U_P auf $U_{P'}$. Damit wird die Spannungsdifferenz gegen die Sonde $U_S - U_P$ und damit auch der Sondenstrom verkleinert. Dem normalen Verlauf: Anwachsen des Sondenstromes nach der Bogenachse hin, wirkt also die Störung, die ebenfalls nach der Bogenachse hin wächst, entgegen. Ist die Störung groß genug, so wird sie schließlich überwiegen, so daß an Stelle der Spitze der Sondenstromkurve eine Einbuchtung auftritt. Man muß danach zweierlei erwarten: 1. Die Einbuchtung muß mit der Dicke der Sonde zunehmen, da dann die Störung zunimmt. 2. Die Einbuchtung muß bei der beschriebenen Schaltung verschwinden,

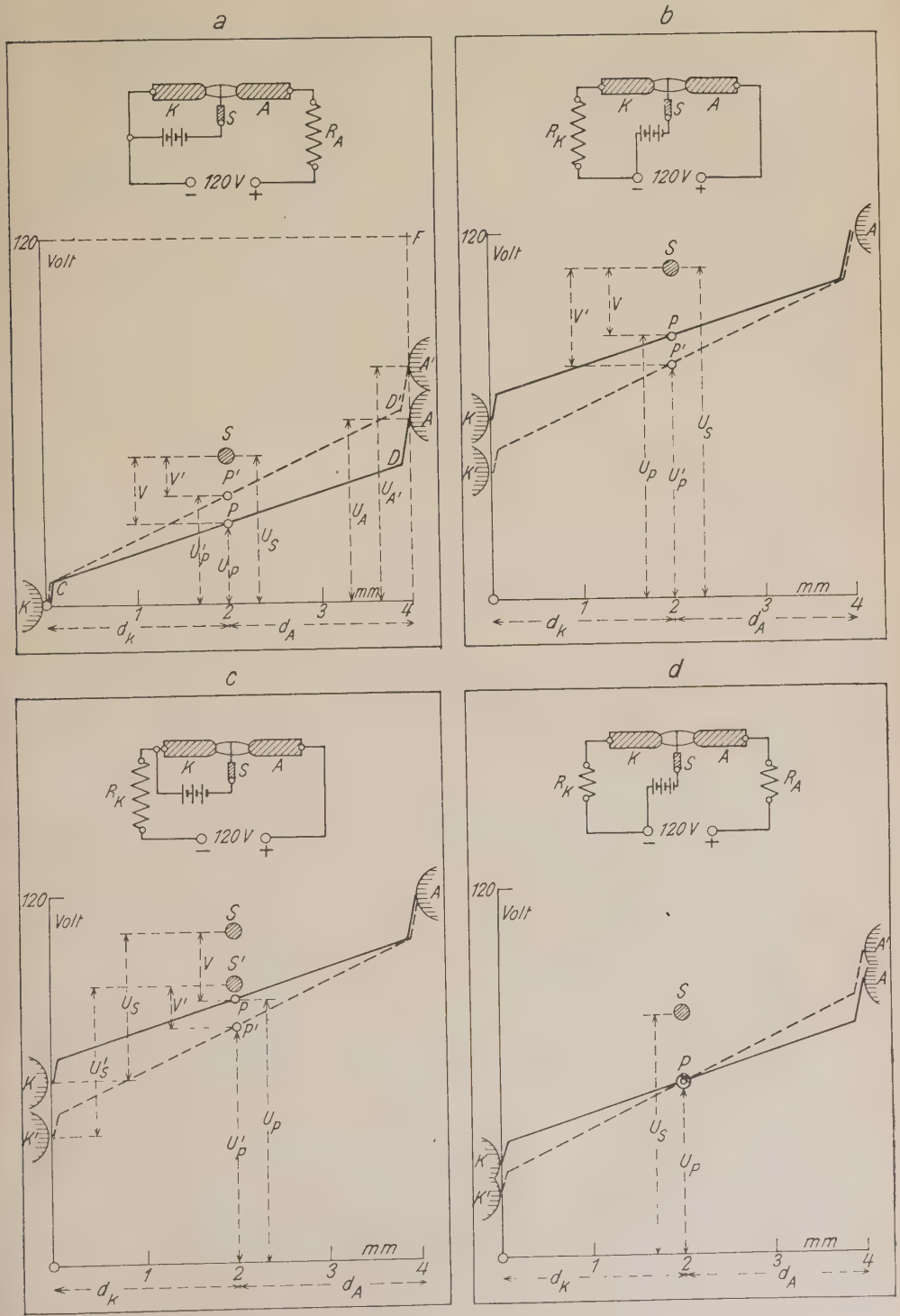

Abb. 8. Potentialverschiebung infolge der Bogenstörung (Einfluß der Schaltung)

wenn man in unmittelbarer Nähe der Kathode mißt. Nach der Anode hin muß sie aber zunehmen und in unmittelbarer Nähe der Anode dem Gesamtbetrag der Störung entsprechen. Beide Vermutungen bestätigten sich experimentell.

Diesen Zusammenhang kann man durch eine Veränderung der Schaltung noch mehr sichern. Legt man den Bogenvorschaltwiderstand an die Kathodenseite, so bleibt bei einer Störung jetzt das Anodenpotential fest und das der Kathode verschiebt sich nach unten. Liegt außerdem das Sondenpotential fest gegen den —-Pol der Bogenbatterie (Abb. 8b), so wird durch die Störung die Differenz $U_S - U_P$ größer, also auch der Sondenstrom. Die Störung wirkt hier in gleichem Sinne wie der normale Verlauf, so daß keine Einbuchtung der Sondenstromkurve auftreten kann, sondern eine Verschärfung der Spitze. Auch dies tritt ein, wie ein Vergleich der beiden Kurven Abb. 2b, c zeigt. Sie sind unter sonst gleichen Bedingungen aufgenommen, nur liegt bei b der Vorschaltwiderstand vor der Anode, bei c vor der Kathode. Endlich kann man noch den Vorschaltwiderstand wieder vor die Kathode schalten, das Sondenpotential aber jetzt nicht gegen die Bogenbatterie, sondern gegen die Kathode festlegen [indem man die Sondenspannung einer Batterie entnimmt, deren negativer Pol mit der Kathode verbunden ist (Abb. 8c)]. Dann sinkt bei der Sondendurchführung zwar auch das Raumpotential um den Betrag $\Delta E_B \frac{d_K}{d_K + d_A}$ in P, aber gleichzeitig sinkt das Sondenpotential um den ganzen Wert ΔE_B. Es resultiert also auch hier wieder eine Gegenwirkung und damit eine Einbuchtung des Sondenstromoszillogramms. Auch hier ist wie bei der Schaltung in Abb. 8a die Einbuchtung an der Kathode am kleinsten, da sich hier Sonden und Raumpotential zwar am stärksten, aber um nahezu denselben Betrag verschieben; an der Anode ist sie am größten, denn das Sondenpotential sinkt auch hier um den ganzen Störungsbetrag, das Anodenpotential bleibt aber fest.

Auf Grund der geschilderten Verhältnisse ist es möglich, eine Methode aufzubauen, um den Einfluß der Bogenstörung auf den Sondenstrom zu kompensieren (Abb. 8d). Man legt das Potential der Sonde fest gegen den —-Pol der Bogenbatterie und verteilt den gesamten Bogenvorschaltwiderstand auf die Kathoden- und Anodenseite! Dann wird gleichzeitig das Kathodenpotential nach unten und das Anodenpotential nach oben verschoben. An einem bestimmten Punkt der Säule muß danach das Raumpotential (gegen den —-Pol der Batterie) fest bleiben, wie groß auch die Gesamtstörung des Bogens gemacht wird. Es findet also gewissermaßen eine Drehung der Potentialkurve um diesen Punkt statt. Durch verschiedene Verteilung des Widerstandes auf Anoden- und Kathodenseite kann man diesen Punkt verschieben und es immer so einrichten, daß er mit dem Ort der Sonde zusammenfällt. Dann sind Sonden- und Raumpotential von der Störung unabhängig und man mißt das Potential des ungestörten Bogens an dieser Stelle.

Einige Versuche zeigten, daß sich ein Punkt erreichen läßt, bei dem diese Kompensation erfüllt ist. Zu jeder Lage der Sonde im Bogen, charakterisiert durch einen bestimmten Abstand von den

Elektroden, gehört eine bestimmte Verteilung des Vorschaltwiderstandes vor Kathoden- und Anodenseite. Und zwar müßte unter der Annahme einer gleichmäßigen Feldstärkenerhöhung in der Säule die Kompensation dann eintreten, wenn sich die Widerstände vor der Kathoden- bzw. Anodenseite zueinander verhalten wie die entsprechenden Entfernungen der Sonde von der Kathode bzw. der Anode. Der Versuch zeigt, daß diese Kompensation an einer anderen als der erwarteten Stelle eintritt, ein Zeichen dafür, daß die Voraussetzung einer gleichmäßigen Feldstärkenerhöhung nicht genügend erfüllt ist. Die angegebene Erklärung für das Zustandekommen

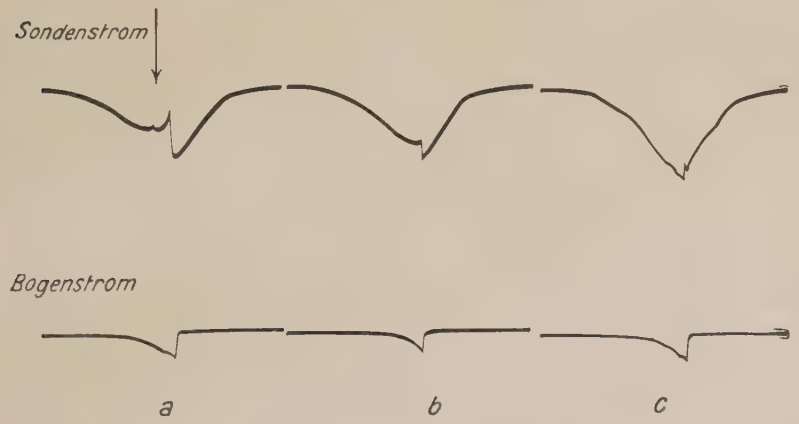

Abb. 9. Verhinderung der Potentialänderung in der Umgebung der Sonde durch Kompensationsschaltung

der verschiedenen Typen von Sondenstromkurven bleibt davon unberührt. Es bietet sich sogar die Möglichkeit, aus der Abweichung von dem zu erwartenden Wert des Kompensationspunktes, nachträglich die versuchsweise zugrunde gelegte Feldstärkenerhöhung zu korrigieren und Aufschluß über die tatsächlichen Feldstärkenveränderungen in der Säule zu erhalten.

Abb. 9 zeigt 3 Oszillogramme, bei denen in Kompensationsschaltung die Verteilung der Widerstände vor Kathode und Anode des Bogens so verändert wurde, daß von a) nach b) fortschreitend eine Annäherung an den Kompensationspunkt erreicht wurde. Dementsprechend geht auch die Einbuchtung der Sondenstromkurve zurück.

§ 5. Der Einfluß des Widerstandes im Sondenkreis

Abb. 10 zeigt eine Schar von Sondercharakteristiken, deren Aufnahmebedingungen sich nur dadurch unterscheiden, daß bei jeder ein anderer Widerstand R_A im Sondenkreis lag. Man erkennt

bei allen Kurven gut die erwartete charakteristische Form, bei allen auch den das „Raumpotential“ kennzeichnenden Knick, der bei mittleren Widerständen am besten ausgeprägt ist. Die Kurven verlaufen bei um so niedrigeren Stromwerten, je höher R_A ist. Sie schneiden alle im gleichen Punkt die Abszisse. Auf der Abszisse sind die momentanen Spannungswerte der Sonde aufgetragen. Sie wurden dadurch erhalten, daß die vor der Messung an der Sondenspannungsbatterie eingestellten Spannungswerte um denjenigen Betrag korrigiert wurden, der sich durch den Spannungsabfall an dem im Sondenkreis liegenden Ohmschen Widerstand bei der jeweiligen Größe des Sondenstromes ergibt.

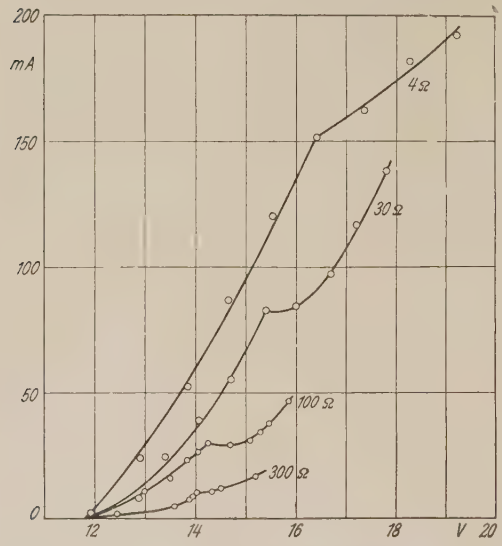

Abb. 10. Widerstandsabhängigkeit der Sondencharakteristiken

Man sieht, daß die durch die Knicke in den einzelnen Kurven gekennzeichneten „Raumpotentiale“ beträchtlich voneinander abweichen, und zwar so, daß, bei kleinstem Widerstand, also höchstem Sondenstrom, auch der höchste Potentialwert gemessen wurde. Die verschiedenen „Raumpotentiale“ sind in Abb. 11 noch einmal besonders als Funktion des jeweils am Knickpunkt fließenden Sondenstromes aufgetragen. Man erkennt hier noch deutlicher das Ansteigen der „Raumpotentialwerte“ mit dem Sondenstrom. Um also das Raumpotential bei möglichst wenig gestörtem Bogen zu messen, muß man bestrebt sein, den Sondenstrom klein zu halten,

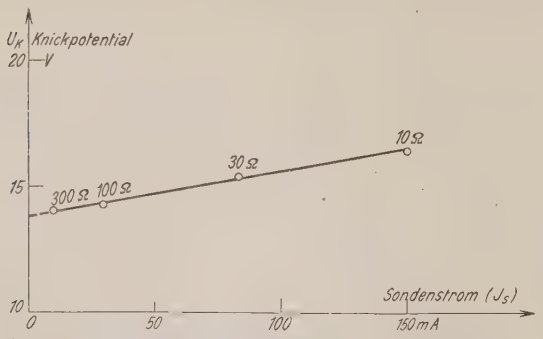

Abb. 11. Potentialverschiebung in der Umgebung der Sonde als Folge des Trägerentzuges

was man durch einen genügend großen Widerstand im Sondenkreis erreichen kann.

In den Langmuirschen Formeln[1]) für die Abhängigkeit des Sondenstromes von dem an die Sonde gelegenen Potential ist kein Einfluß eines Widerstandes vorgesehen; der Sondenstrom hängt in Niederdruckentladungen, in denen bekanntlich die Langmuirsche Theorie uneingeschränkte Gültigkeit hat, nur von der Potentialdifferenz zwischen Sonde und umgebendem Plasma ab, konstante Sondendicke vorausgesetzt. In unserem Fall einer Hochdruckentladung zeigt sich aber eine deutliche Abhängigkeit der Sondenströme von dem Widerstand im Sondenkreis. Dieses abweichende Verhalten läßt sich als Folge eines mehr oder minder starken Trägerentzuges verstehen. Wenn das Anwachsen des Sondenstromes durch die Stauwirkung eines großen Widerstandes im Sondenkreis rasch gebremst wird, bildet sich schon bei kleineren Sondenstromstärken ein stationärer Zustand aus, während bei kleineren Widerständen im Sondenkreis der Entzug rascher anwachsen kann. Die Umgebung befindet sich demnach je nach der Größe des Entzuges immer in einem etwas anderen Zustand. Bei kleinen Widerständen findet ein großer Entzug statt. Infolgedessen wird das mittlere Potential in der Sondenumgebung um so positiver, je größer der Entzug ist. Zwei Punkte auf zwei verschiedenen Charakteristiken, die zum gleichen Sondenpotential gehören, bezeichnen zwei etwas verschiedene Potentiale in der Umgebung der Sonde, und zwar gehört zu demjenigen Punkt mit dem größeren Sondenstrom auch das positivere „Raumpotential". Wenn wir die Knickpunkte zunächst einmal unbedenklich mit dem Raumpotential, also etwa dem mittleren Potential in der unmittelbaren Umgebung der Sonde identifizieren, sieht man, wie sich ganz in dem besprochenen Sinne bei wachsendem Entzug die Raumpotentiale nach höheren Werten verschieben. Die verschiedenen Sondencharakteristiken schneiden sich an genau dem gleichen Punkt der Abszisse, da bei verschwindendem Entzug natürlich auch alle Unterschiede zwischen den Sondencharakteristiken fortfallen. Die Existenz einer solchen Sondenkurvenschar mit dem Widerstand als Parameter zeigt wiederum die Verschiedenheit der Verhältnisse im Hochdruckbogen und in der Niederdruckentladung. In der Niederdruckentladung bildet sich eine Raumladungszone aus, die das Sondenfeld nach außen abschirmt. Der Trägerdurchtritt durch die Grenzfläche zwischen Raumladungszone und Plasma ist allein durch Diffusion bestimmt. In Hochdruck-

1) J. Langmuir, a. a. O.

entladungen ist von einer solchen Abschirmung des Sondenfeldes nicht die Rede, sondern das Feld hat einen gewissen Durchgriff in den „ungestörten" Bogen. Die Trägernachlieferung erfolgt nicht mehr durch reine Diffusion, sondern die schwachen, von der Sonde herrührenden Felder wirken entscheidend mit und bedingen je nach der besonderen Art der Feldverteilung immer verschiedene Sondencharakteristiken.

§ 6. Die Abhängigkeit der Sondencharakteristik von der Temperatur der Sonde

Um die thermische Störung des Bogens zu verkleinern, wurden die Sonden so ausgebildet, daß sie elektrisch geheizt werden konnten. Es gelang zwar nicht, durch diese Heizung der Sonden die Störung von Bogenstrom- und Bogenspannung merklich zu beeinflussen. Hingegen erwies sich der Einfluß der Heizung, d. h. der jeweiligen Temperatur auf die Sondencharakteristik als beträchtlich.

Zur Untersuchung dieses Einflusses wurden Doppelsonden benutzt; d. h. zwei gleiche Sonden waren im Abstand von etwa 12 mm an einem gemeinsamen Kupferbügel befestigt, in der Art, daß eine von ihnen sich elektrisch heizen ließ. Der Abstand der Sonden war so bemessen, daß die Zeit zwischen dem Durchgang der einen und der anderen ausreichte, um den Bogen den ungestörten Zustand wieder annehmen zu lassen.

Die Bestimmung der Sondentemperatur wird durch zwei Umstände sehr erschwert: 1. Die zeitliche Änderung der Temperatur während des Durchgangs der Sonde durch den Bogen erfolgt sehr schnell.

2. Das Temperaturgefälle längs der Sonde ist sehr stark. Aus dem ersten Grunde scheiden alle optischen Methoden praktisch aus. Auf elektrischem Wege könnte man die Sondentemperatur durch eine oszillographische Widerstandsmessung ermitteln. Man würde dann tatsächlich den gewünschten Momentanwert erhalten. Dem steht aber das große Temperaturgefälle längs der Sonde entgegen. Man würde nur einen Mittelwert messen, aus dem man nichts über die wirkliche Temperatur an der Durchführungsstelle entnehmen könnte. Unter Vermeidung dieser Schwierigkeiten wurde ein Verfahren gewählt, das zwar auf den ersten Blick etwas roh erscheint, aber doch zu brauchbaren Resultaten geführt hat. Es wurde die Temperaturerhöhung durch die elektrische Heizung und die durch Aufheizung im Bogen gesondert bestimmt, die wirkliche Temperatur durch Addition der beiden Teilbeträge gefunden. Die tatsächliche Temperatur T der Sonde im Bogen setzt sich also aus

der Ausgangstemperatur T_0, der Temperaturerhöhung durch die Heizung ΔT_1 und der Temperaturerhöhung infolge des Durchschlagens durch den Bogen ΔT_2 zusammen.

$$T = T_0 + \Delta T_1 + \Delta T_2.$$

Der Heizstrom wurde so einreguliert, daß die Sonde in der Mitte (an der Stelle, wo sie die Bogenachse schneidet) eben in schwache Rotglut kommt. Für einen schwarzen Körper ist dieser Punkt durch eine Temperatur von etwa 530° C gekennzeichnet. Für Platin wird die entsprechende Temperatur[1]) etwas höher liegen. Die Temperaturen für kleinere Heizströme wurde nach der Beziehung

$$\Delta T_1 = c_1 \cdot J^2 \cdot R$$

(ΔT = Temperaturerhöhung, J = Heizstromstärke, R = Sondenwiderstand)

interpoliert, wobei die Konstante c_1 aus dem obigen Fixpunkt berechnet wurde. Die Anwendung dieser Gleichung dürfte genügend genaue Resultate liefern, da die Strahlung bei diesen Temperaturen noch keine wesentliche Rolle spielt. Für höhere Ströme wurde dieser Zusammenhang bis etwa 700° extrapoliert. Die Aufheizung der Sonde im Bogen wurde proportional der Verweilzeit, also umgekehrt proportional der Sondendurchführungsgeschwindigkeit gesetzt, da die Temperatur der Sonde gegenüber der Bogentemperatur als klein zu bezeichnen ist, so daß sich die Temperaturdifferenz zwischen Sonde und Bogengas während des Durchschlagens nur wenig ändert.

$$\Delta T_2 = c_2 \cdot \Delta t.$$

ΔT_2 bedeutet die Erwärmung der Sonde, Δt die Verweilzeit im Bogen. Zur Ermittlung der Konstanten c_2 diente als Fixpunkt die Schmelztemperatur von Platin. Die Messung geschah so, daß die Durchführungsgeschwindigkeit einer Sonde bestimmter Dicke in möglichst kleinen Stufen allmählich vermindert wurde, so lange, bis die Sonde an einem Punkte eben schmolz. Dann hat ihre Temperatur an diesem heißesten Punkt, da wo sie die Bogenachse schneidet, offenbar eben den Schmelzpunkt überschritten, also bei Platin etwa 1780° erreicht. Damit hat man nun für jede Durchführungsgeschwindigkeit die Kenntnis der zugehörigen Temperatur. Auf diese Weise wurden Sonden verschiedener Dicke untersucht. Abb. 12 gibt die Abhängigkeit der Temperaturerhöhung der Sonde durch den Bogen von der Sondendicke bei konstanter Durchführungsgeschwindigkeit an (v = 40 cm/sec).

1) Es sind immer Celsiustemperaturen gemeint.

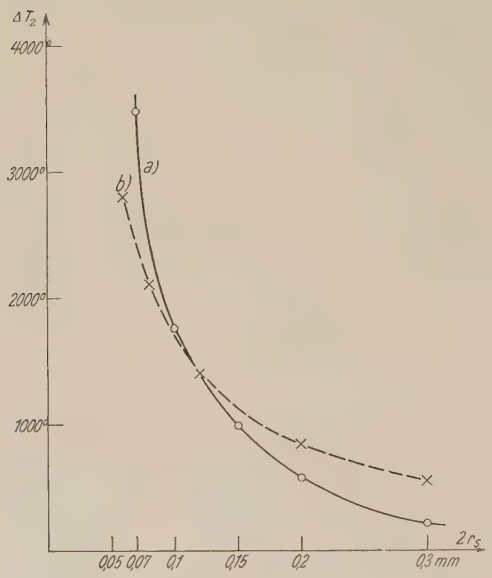

Abb. 12. Sondentemperatur als Funktion der Sondendicke ($2r_s$).
a) experimentell, b) theoretisch

Die Art der Abhängigkeit wird etwa durch eine gleichseitige Hyperbel mit den Koordinatenachsen als Asymptoten wiedergegeben (punktierte Kurve), was auf folgende Weise verständlich wird. Die Temperaturerhöhung der Sonden bei konstanter Durchführungsgeschwindigkeit ist direkt proportional zur Sondenoberfläche und indirekt proportional zum Sondenvolumen

$$\Delta T_2 = \text{const} \cdot \frac{2r_s \cdot \pi \cdot l}{r_s^2 \cdot \pi \cdot l} = \text{const} \cdot \frac{1}{r_s}$$

(ΔT = Temperaturerhöhung, r_s = Sondenradius, l = Sondenlänge) d. h. also, daß der Zusammenhang zwischen Sondentemperatur und Sondenradius durch eine gleichseitige Hyperbel mit den Ordinatenachsen als Asymptoten gegeben ist, was mit dem Experiment recht gut übereinstimmt.

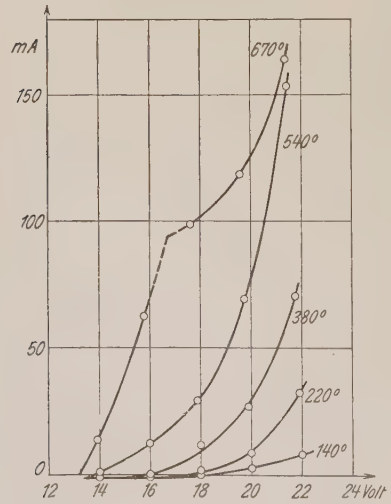

Abb. 13. Temperaturabhängigkeit der Sondencharakteristiken

Die maximale Temperatur tritt allerdings nicht auf, wenn die Sonde gerade die Bogenachse schneidet, sondern sicher etwas später wegen der Wärmeträgheit der Sonde, und weil ja auch die Teile des Bogens außerhalb der Achse immer noch heißer sind als die Sonde. Die tatsächlichen Temperaturen, die die Sonde im Augenblick des maximalen Sondenstromes hat, dürften also etwas unter derjenigen liegen, die auf die angegebene Weise bestimmt wurden.

In Abb. 13 ist eine Schar von Stromspannungscharakteristiken

einer 0,3 mm starken Platinsonde dargestellt. Der Parameter der Kurvenschar ist die Sondentemperatur, die durch die elektrische Heizung von 140—670° variiert wurde. 140° ist dabei diejenige Temperatur, die die Sonde bei der benutzten Durchführungsgeschwindigkeit ohne zusätzliche Heizung allein durch die Aufheizung im Bogen erhält. Der bei einem bestimmten Sondenpotential aufgenommene Strom wächst bei einer Temperaturerhöhung um nur einige Hundert Grad auf ein Vielfaches seines Betrages an. Das „Nullstrompotential", dasjenige Potential, bei dem der Sondenstrom den Wert Null hat, rückt bei Temperaturerniedrigung nach höheren Potentialwerten. (Das Potential der Sonde ist um die Abszissenwerte positiv gegenüber der Kathode.) Es sei noch einmal darauf hingewiesen, daß bei Sondenstromerhöhung durch Verkleinerung des Widerstandes im Sondenkreis das Nullstrompotential unverändert erhalten bleibt (Abb. 10). Bei stark negativen Potentialen der Sonde gegenüber dem Raumpotential ist der Sondenstrom fast reiner Ionenstrom. In dem Gebiet oberhalb des Nullstrompotentials überwiegt völlig der Elektronenstrom. Wenn wir also in dem ersten Gebiet den Elektronenstrom, in dem zweiten den Ionenstrom vernachlässigen, so ergibt der Quotient der Sondenströme bei kalter und bei zusätzlich geheizter Sonde den Grad der Verstärkung bei Ionenstrom $V^+ = \frac{i'_+}{i_+}$ bzw. bei Elektronenstrom $V^- = \frac{i'_-}{i_-}$. Wenn man die Ionenstromkurve in das Gebiet des beginnenden Elektronenstromes extrapoliert, kann man auch in dem kritischen Gebiet um das Nullstrompotential herum den Anteil der Verstärkung des Ionen- und des Elektronenstromes gesondert messen. Dabei zeigt es sich, daß der Verstärkungsgrad für den Elektronenstrom um 1—2 Größenordnungen größer ist als derjenige für den Ionenstrom. In Abb. 14 sind eine Schar von Sondencharakteristiken bei variierter Sondentemperatur und die dazugehörigen Verstärkungsfaktoren für Elektronen und Ionenstrom in Abhängigkeit vom Sondenpotential gezeichnet. Der Verstärkungsfaktor für den Ionenstrom bewegt sich zwischen $1^1/_3$ und $1^1/_5$, während er für den Elektronenstrom bei 220° (bezogen auf den Elektronenstrom der ungeheizten Sonde mit einer Temperatur von 140°) den Wert von 2,5 hat. Für 380° beträgt er 8, für 540° 17 und für 670° 68. Für eine Temperaturzunahme von rund 500° (von 140—670°) beträgt der prozentuale Stromzuwachs beim Elektronenstrom etwa das 200—300fache der Ionenstromzunahme. Die Verschiebung des Nullstrompotentials legt im übrigen eine Erklärung für eine meßtechnische Schwierigkeit nahe. Es ist auffällig, daß in Abb. 13 die Charakteristiken für die

kleinen Temperaturen keinen Knick aufweisen, sondern daß ein solcher nur für die am stärksten geheizte Sonde auftritt. Das hat vermutlich folgenden Grund: Wie man aus Abb. 10 sieht, wandert der Knickpunkt nach kleineren Potentialen in dem Maße, wie die Elektronenströme kleiner werden. — Zwischen Abb. 10 und 13 besteht allerdings der Unterschied, daß in dem einen Falle die Sondenströme durch Verkleinerung des Widerstandes im Sondenkreis, in dem anderen Falle durch Heizung der Sonde vergrößert wurden. In beiden

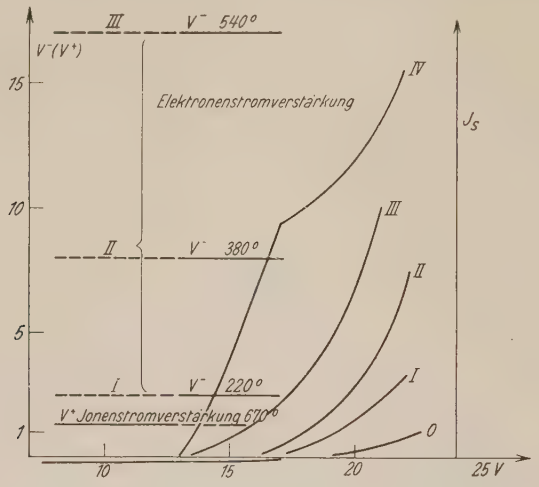

Abb. 14. Temperaturverstärkung des Sondenstromes

Fällen handelt es sich aber um Steigerung des Trägerentzuges, die sich immer als eine Potentialverschiebung der Sondenumgebung auswirken muß. — Ferner wandert nach Ausweis des Experimentes der Nullstrom nach größeren Potentialen, je niedriger die Temperatur der Sonde liegt. Es wandern also der Nullstrompunkt und der Knickpunkt in dem Maße, wie die Sondentemperatur niedriger wird auf der Charakteristik aufeinander zu, so daß also das Kurvengebiet zwischen Nullstrom- und Knickpotential schrumpft und sich dadurch immer mehr der Messung entzieht. Bei den Kurven von 220 und 140° ist es von vornherein vergeblich nach dem Knick zu suchen; denn da 16,8 Volt (die Lage des Knicks auf der oberen Kurve, Abb. 13) als obere Grenze für die Knickpunkte der darunter liegenden Kurven anzusehen ist, müssen diese Knickpunkte für die Charakteristiken von 220 und 140° bereits unterhalb der Abszissenachse liegen, also in jenem Gebiet, wo der Elektronenstrom kleiner ist als der Ionenstrom. Aber auch für die Kurven von 380 und 540° ist die Lage der Knickpunkte wahrscheinlich so ungünstig, daß sie

nicht mehr sicher zu ermitteln ist. Vielleicht liegt in dieser Richtung die Erklärung dafür, daß manche Autoren in ihren Charakteristiken gar keine Knicke erhalten, während sie von anderen deutlich gefunden werden. Es ergibt sich daher als praktische Regel für die Aufnahme einer Charakteristik in einer Hochdruckentladung, die Sonde kräftig zu heizen und anderseits durch einen genügend großen Widerstand im Sondenkreis den Entzug klein zu halten.

Eine Bemerkung muß noch gemacht werden über den Zusammenhang zwischen Sondentemperatur und Bogenstromstörung. Ursprünglich war beabsichtigt gewesen, durch die zusätzliche Sondenheizung die Bogenkühlung und damit die Strom- und Spannungsänderung des Bogens zu verkleinern. Es zeigte sich aber, daß trotz kräftiger Heizung der Sonde die Bogenstörung (in Strom und Spannung gemessen) ihren Betrag unverändert beibehielt, ja daß sogar bei besonders starker Heizung und dementsprechend großem Elektronenstrom die Bogenstromstörung (in der Bogenstromabnahme zu erkennen) etwas zunahm.

Der Einfluß der Temperaturveränderung der Sonde läßt sich also folgendermaßen zusammenfassen:

1. Die Temperatur der Sonde ist von entscheidendem Einfluß auf den Verlauf der Charakteristik.

2. Die Temperaturen, die zu einer Steigerung des Elektronensondenstromes auf den 10—100fachen Wert Anlaß geben, sind verhältnismäßig niedrig (kleiner als 700°).

3. Der zur Sonde fließende Ionenstrom wird durch Temperatursteigerung der Sonde wenig verstärkt (um 20—30%). Der zur Sonde fließende Elektronenstrom hingegen wird sehr kräftig verstärkt (auf den 10—100fachen Wert).

4. Innerhalb einer Schar von Sondencharakteristiken, die bei verschiedener Sondentemperatur, aber unter sonst gleichen Umständen aufgenommen wurden, verschiebt sich das Nullstrompotential mit steigender Sondentemperatur nach kleineren Potentialwerten, im Gegensatz zu einer Schar, bei der der Widerstand im Sondenkreis variiert, die Sondentemperatur aber konstant gehalten wurde (Abb. 10 und 13).

5. Die Größe der Bogenstrom- und -spannungsstörung ist in dem betrachteten Temperaturintervall unabhängig von der Temperatur der Sonde.

Es liegt nahe, an eine Glühemission der Sonde zu denken, um das beschriebene Temperaturverhalten der Sonde zu erklären. Diese Möglichkeit scheidet erstens wegen der viel zu kleinen Temperaturen

der Sonde aus. Wichtiger ist noch ein anderer Grund. Der Verstärkungseffekt tritt in voller Stärke in dem Gebiet zwischen Raumladungspotential und Nullstrompotential auf, also bei Potentialen der Sonde, die noch negativ gegen die Umgebung sind. Die von der Sonde abgeschleuderten Glühelektronen wären also den aus dem Plasma kommenden Elektronen entgegengesetzt gerichtet und müßten daher den von der Sonde normalerweise aufgenommenen Strom verkleinern und nicht vergrößern. Eine Glühemission von positiven Ionen zur Erklärung heranzuziehen, scheitert in noch stärkerem Maße an den zu kleinen Temperaturen. Es ist durchaus möglich, daß dieses starke Anwachsen des Elektronenstromes bei Heizung der Sonde sich mit der Vergrößerung der mittleren, freien Weglänge erklärt. Es wäre auch zu verstehen, daß sich dieser Einfluß bei den im Gegenfeld andiffundierenden Elektronen bedeutend stärker bemerkbar macht als bei dem positiven Ionenstrom, der ja in dem Gebiet, wo man ihn bequem verfolgen kann, praktisch gesättigt ist. Eine genauere Untersuchung dieser Frage ist im Gange. Es darf aber nicht verschwiegen werden, daß dieser Temperatureffekt auch mit der Oberflächenbeschaffenheit der Sonde zusammenhängen muß. Die Platinsonden zeigen nämlich eine deutliche Alterungserscheinung. Wenn sie genügend oft durch den Bogen geschlagen worden waren, wurde der Verstärkungseffekt immer kleiner. Durch Reinigen der Sonde mit Salzsäure oder Salpetersäure gelang es nicht, sie in den früheren Zustand wieder zurückzubringen. Zum Ziele führte allerdings eine kurzzeitige Kathodenzerstäubung, bei der die Sonde als Kathode diente. Es handelte sich also offenbar um eine hartnäckige Verunreinigung der Sondenoberfläche. In welcher Weise hier Adsorptionserscheinungen an der Oberfläche der Sonde Einfluß haben, ist noch nicht klar. Wenigstens ist bei reiner Sonde der Temperatureffekt maximal ausgeprägt. Auch hierüber sind die Versuche noch nicht abgeschlossen.

§ 7. Der Längsgradient der Säule

Aus einer rechnerischen Abschätzung, die wir der Kürze halber nicht mitteilen, ergibt sich, daß der Knickpunkt der Charakteristik bei demjenigen Sondenpotential liegt, bei dem der der Kathode am nächsten liegende Punkt der Sonde das Potential seiner unmittelbaren Umgebung erreicht hat. Damit hat man allerdings noch nicht die Kenntnis desjenigen Potentials, das der betreffende Punkt im ungestörten Bogen besitzt. Denn dazu müßte man wissen, wie der Potentialverlauf in der Kühlzone um die Sonde herum ist. Trotzdem wollen wir den auf diese Weise gemessenen Potentialverlauf in der

Säule mitteilen, da er immerhin einen Aufschluß über die in der Säule herrschenden Feldstärken gibt und unter Zuhilfenahme von plausiblen Annahmen die tatsächlichen Potentialwerte zunächst wenigstens zu schätzen gestattet. Die Feldstärke in der Säule beträgt 50 Volt/cm (Abb. 15).

Kurve *a* und *b* zeigen also den Unterschied, der sich ergibt, wenn man auf den richtigen Ort im Bogen, auf den Kathoden-

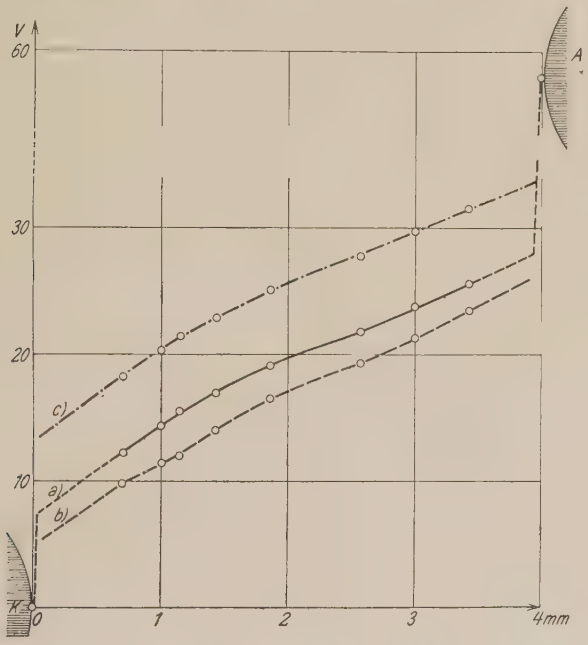

Abb. 15. Potentialverlauf im Kohlebogen

nächsten Punkt der Sonde, bezieht und nicht mehr wie bisher auf die Sondenmitte.

Der Potentialverlauf *b* gibt aber trotzdem erst die gestörten „Raumpotentialwerte". Wenn man den im ungestörten Bogen vorhandenen Potentialverlauf erhalten will, muß man ihn noch um denjenigen Betrag korrigieren, um den sich das Raumpotential an einem bestimmten Punkt im ungestörten Bogen gegen dasjenige im gestörten Bogen unterscheidet. Wenn man an der Kurve *b* denjenigen Korrektionsbetrag anbringt, den Mason[1]) abschätzt (etwa 8 Volt), so erhält man die Kurve *c*, die jetzt endlich, vorbehaltlich der Richtigkeit der Masonschen Schätzung, ein Bild von dem tatsächlichen Potentialverlauf im ungestörten Bogen gibt.

1) R. C. Mason, a. a. O.

In dem in Abb. 15 wiedergegebenen Potentialverlauf *a* sind die ermittelten Raumpotialwerte in der bisher üblichen Weise dem Ort der Sondenachse zugeordnet. In der Kurve *b* sind die Raumpotentiale auf die der Kathode zugewandten Kante der Sonde bezogen, wie es tatsächlich sein muß.

Dann ergibt sich für den Kathodenfall ein Wert von etwa 13 Volt, für den Anodenfall ein solcher von 24 Volt, was mit den Masonschen Angaben leidlich übereinstimmt (Mason: Kathodenfall = 10 Volt, Anodenfall = 20 Volt).

§ 8. Diskussion der Sondenstromcharakteristiken

Die Erfolge der Langmuirschen Sondentheorie haben vielfach dazu verführt, den Anwendungsbereich der Theorie für größer zu halten, als er tatsächlich ist. Obgleich schon in den Langmuirschen Arbeiten energisch darauf hingewiesen wurde, daß die Sondenmethode nur dann zu verläßlichen Resultaten führen kann, wenn die Dicke der sich um die Sonde ausbildenden Raumladungszone klein gegenüber der mittleren freien Weglänge der Ladungsträger ist, wurde die gleiche Methode zunächst unverändert auf Entladungen hohen Drucks übertragen, wo die genannte Bedingung keineswegs erfüllt ist. Die Modifikationen, die sich durch Einbringen einer Sonde in eine Hochdruckentladung ergeben, wurden zunächst ohne nähere Untersuchung als verhältnismäßig klein angesehen und es wurde mit der üblichen Deutung der Sondencharakteristik operiert. So ergaben sich denn bei Nottingham[1]) Resultate bezüglich der Potentialverteilung und Elektronentemperatur in einem normalen Kohlebogen, die wohl nicht mehr zu halten sind, nachdem die erheblichen Veränderungen, die eine Sonde in einem Hochdruckbogen hervorbringt, genauer untersucht sind.

In der Folgezeit sind von Bramhall und Myer Sondenmessungen in Hochdruckentladungen ausgeführt worden, die in gleicher Weise ohne Dikussion der durch die Sonde hervorgerufenen Störung die Sondencharakteristiken in der herkömmlichen Weise interpretieren und Resultate über Elektronentemperatur, Raumpotential und Ladungsträgerkonzentration ableiten, was ohne Berücksichtigung der Störwirkung der Sonde zu großen Fehlern führen muß. So bestimmt beispielsweise Bramhall[2]) aus der Elektronenstromdichte am Knickpunkt einer Charakteristik die Diffusionsstromdichte (random current density) und daraus das Verhältnis

1) W. B. Nottingham, a. a. O.
2) E. H. Bramhall, a. a. O.

$\frac{\text{Driftstromdichte}}{\text{Diffusionsstromdichte}}$, das maßgeblich in die Diskussion seiner Ergebnisse eingeht. Daß sich eine solche Bestimmung nicht ohne weiteres vornehmen läßt, sieht man sofort, wenn man noch einmal in Abb. 10, den Zusammenhang zwischen Widerstand und Absolutgröße des Sondenstromes im Knickpunkt betrachtet. Je nachdem, wie man den Widerstand im Sondenkreis wählt, erhält man einen anderen Wert für die Absolutgröße des Sondenstromes und damit auch für die Diffusionsstromdichte im Bogen. Und zwar weichen die Werte, die man auf diese Weise erhalten kann, leicht um den Faktor 15 voneinander ab. In derselben Weise wie die Veränderung des Widerstandes im Sondenkreis wirkt sich aber auch eine Temperaturveränderung der Sonde aus. Auch in diesem Falle lassen sich für die Absolutwerte der Sondenströme Werte erhalten, die genau so stark voneinander abweichen, obwohl die Analyse der Störung zeigt, daß der Bogen bei Temperaturvariation der Sonde keine merkliche Veränderung der Störung erfährt. Bei praktisch in gleicher Weise gestörtem Bogen mißt man völlig andere Werte für die Trägerkonzentration, die Diffusionsstromdichte und die andern Zustandsgrößen im Bogen, je nachdem wie groß der Widerstand im Sondenkreis oder die Temperatur der Sonde ist. Demgegenüber ergibt sich die Notwendigkeit, bevor man aus der Sondenstromcharakteristik eingehende Schlüsse auf die Zustandsgrößen im Bogen zieht, die Störung noch weiter zu untersuchen. Das augenblickliche Bild läßt sich etwa in der folgenden Weise schildern: Die Sonde ist umgeben von einer Kühlzone, die mehrmals so dick sein kann wie der Durchmesser der Sonde selbst. Man darf dieser Kühlzone nicht die gleiche Funktion zuweisen, die in der alten Langmuirschen Theorie die Raumladungszone hat. Am Rande der Kühlzone ist nicht wie bei der Raumladungszone das Sondenpotential gegen den Außenraum durch die im Innern liegenden Raumladungen abgeschirmt, sondern es greifen schwache elektrische Felder noch weiter hinaus. Die Sondenströme sind also nicht allein durch Diffusion durch die äußere Grenze der Kühlzone bedingt, sondern der Einfluß der durchgreifenden Felder, die entweder bremsen oder beschleunigen, macht sich gegenüber der Diffusion sehr bemerkbar oder er überwiegt ihn sogar. Wenn sich die Kühlzone grundsätzlich wieder genau so verhalten würde wie die Raumladungszone, wenn also der Durchtritt von Trägern in die Sphäre der Sonde nur unter der Wirkung der Diffusion zustande käme, wäre nicht zu verstehen, warum, wie die Widerstandscharakteristiken zeigen, bei gleichem Sondenpotential verschiedene Sondenströme fließen können, je nach-

dem, wie der Widerstand im Sondenkreis bemessen wird. Vom Rande der Kühlzone bis zur Sonde besteht ein Temperaturabfall von etwa 6000° bis zur Temperatur der Sonde, die beispielsweise in der vorliegenden Arbeit zwischen 140—670° lag. Die Temperatur des Gases in der unmittelbaren Umgebung der Sonde dürfte nicht viel über der Sondentemperatur liegen. Die Temperatur der positiven Ionen wird wiederum mit der Gastemperatur (wegen der Massengleichheit beim Stoß zwischen neutralem Atom und Ion) einigermaßen im Gleichgewicht stehen. Über die Elektronentemperatur ist nun bedeutend schwieriger eine Aussage zu machen. Die Neigung der Sondencharakteristik gibt höchstens einen Aufschluß über die Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen in der unmittelbaren Umgebung der Sonde, die ja natürlich nicht mit der Elektronentemperatur im ungestörten Bogen zu intendifizieren ist. Ehe man mit dieser Angabe aber etwas anfangen kann, muß man wissen, wie sich die Temperatur der Elektronen bei ihrem Flug durch die Kühlzone verändert. Was die allgemeine Bedeutung der Sondencharakteristik in einer Hochdruckentladung anlangt, so geht die Kritik von Mason vielleicht zu weit, wenn er jegliche Ähnlichkeit mit der Sondencharakteristik in einer Niederdruckentladung leugnet, wenn er insbesondere keinen ausgesprochenen Knick in der Charakteristik findet und er davor warnt, aus einer bloßen Neigungsänderung der Charakteristik auf das Raumpotential zu schließen. Wenn man aber die Charakteristiken in Abb. 10 betrachtet, sieht man, daß es sich bei dem „Knick" nicht einfach um eine Stelle handelt, an der sich die Neigung der Kurve ändert, sondern daß an ihr eine markierte Unstetigkeit der Neigung auftritt. Unter welchen Bedingungen dieser Knick mehr oder weniger ausgeprägt sein kann, ist auf S. 556 auseinandergesetzt worden. Es ist sehr wahrscheinlich, daß der Knick bei Sondencharakteristiken in Hochdruckentladungen eine ähnliche oder die gleiche Bedeutung hat wie bei Niederdruckentladungen, nämlich, daß an diesem Punkte der überwiegende Anteil des Elektronenstromes aus einem Diffusionsstrom ein Strom in einem beschleunigenden Sondenfeld wird.

Die Sondencharakteristiken zeigen halblogarithmisch aufgetragen nach der Abszisse hin eine konkave Krümmung (Abb. 16). Diese Eigenschaft läßt sich als Entzugserscheinung deuten. Wenn man den Verlauf der Kurven bei kleinen Sondenströmen nach größeren Werten geradlinig extrapoliert, sieht man, daß mit steigendem Elektronenzug die Charakteristik unter dem Sollwert immer stärker zurückbleibt. Daß die konkave Krümmung der Charakteristik eine Folge des Entzugs ist, wird weiter gestützt durch die Tatsache,

daß die Charakteristik mit dem kleinsten Entzug, weil größten Widerstand im Sondenkreis, am ehesten einer geraden Linie nahekommt. Man wird also mit einigem Grund annehmen können, daß die Neigung dieser Geraden die Temperatur der Elektronen in der Umgebung der Sonde angibt. Unter den vorliegenden Verhältnissen ergaben sich dann Elektronentemperaturen von etwa 9000°. Ob diese Temperaturen über oder unter den Temperaturen der Elektronen im ungestörten Bogen liegen, läßt sich erst entscheiden, wenn man etwas Genaueres über die Bewegung der Elektronen in der Kühlzone weiß. So ist also für die Frage der Potentialbestimmung und die Ermittlung der Elektronentemperatur im Bogen noch keine sichere Methode gefunden worden, allein ist immerhin schon eine Reihe derjenigen Störeinflüsse untersucht worden, die die Anwendung der klassischen Langmuirschen Theorie im Hochdruckgebiet so außerordentlich erschweren. Im übrigen sei darauf hingewiesen, daß das Gas in der Umgebung einer Sonde bezüglich seines thermischen und elektrischen Zustandes eine ganz eigenartige Mittelstellung zwischen dem Plasma einer vollausgebildeten Entladung und einem kalten Gasraum ohne Feld einnimmt.

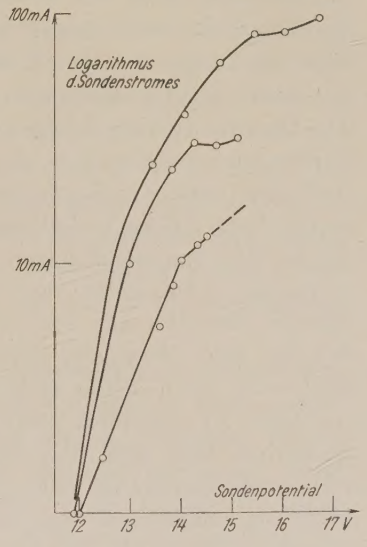

Abb. 16. Sondencharakteristiken, halblogarithmisch aufgetragen

Einerseits ist die Temperatur und die Gasdichte in der Sondenumgebung kaum höher als im Außenraum der Entladung. Andererseits befinden sich in ihr aber hohe Konzentrationen von Trägern. Eine merkliche Rekombination im Gasraum dürfte noch nicht eingesetzt haben, während die Ionisation (etwa nach Ausweis der Masonschen Photographien) fast vollständig aufgehört hat infolge der geringen Temperatur und des Fehlens starker elektrischer Felder. Man hat also Gelegenheit, das Gas in einem Zwischenstadium zwischen ausgebildeter Entladung und kaltem, unangeregtem Zustand zu studieren. Es ist wohl möglich, daß dabei eine Reihe von interessanten Einblicken in die Natur der Hochdruckentladungen gewonnen werden können, auch wenn sich der Wunsch, auf bequeme Weise Potentialbestimmungen im Bogen zu machen, noch nicht erfüllt hat.

Zusammenfassung

Das Durchschlagen einer Sonde durch einen Bogen stört denselben stark. Die Hauptstörung wird durch den Wärmeentzug hervorgerufen. Dementsprechend hängt die Größe der Störung im wesentlichen nur von Sondenradius und Durchführungsgeschwindigkeit, nicht aber von dem an die Sonde gelegten Potential ab. Es bildet sich um die Sonde eine Kühlzone aus, die den mehrfachen Durchmesser der Sonde haben kann. Um zu einer vernünftigen Theorie der Sondenströme in Hochdruckentladungen zu kommen, muß vor allem die Bewegung der Träger in dieser Kühlzone studiert werden. Man mißt mit dem Sondenstrom bestenfalls die Temperatur der Elektronen der Kühlzone, die sowohl größer als auch kleiner als diejenige im ungestörten Plasma sein kann. Die Charakteristiken hängen stark von dem im Sondenkreis liegenden Widerstand ab, was sich als eine Entzugserscheinung erklären läßt. Außerdem sind die Sondenströme gegen die Temperatur der Sonde empfindlich. Eine verhältnismäßig kleine Temperaturerhöhung der Sonde läßt den Sondenstrom beträchtlich anwachsen. Alle Sondenmessungen, die bisher am Hochdruckbogen (1 Atm.) durchgeführt wurden, konnten aus den angeführten Gründen nicht zu richtigen Werten von Trägerkonzentrationen und Potentialen führen. Auch jetzt sind noch keine sicheren Angaben über die Zustandsgrößen im Bogen zu gewinnen, solange keine Theorie der Kühlzone existiert. Immerhin läßt sich aber schon als Regel angeben, daß man zu richtigeren Resultaten kommen wird, wenn man mit großem Widerstand im Sondenkreis und mit vorgeheizter Sonde mißt.

Diese Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Universität Breslau ausgeführt. Herrn Prof. Cl. Schaefer danken wir für viele anregende Diskussionen, wertvolle Ratschläge und Überlassung der Mittel des Instituts, Herrn Dr. M. Steenbeck für fördernde Kritik.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danken wir für den in der Arbeit verwendeten Schleifenoszillographen, der Helmholtzgesellschaft für Bereitstellung von Mitteln zur Beschaffung der notwendigen Apparate.

Breslau, Physikalisches Institut der Universität.

(Eingegangen 28. Juni 1938)

Lebenslauf

Ich, Martin, Helmut, Johannes Arndt, wurde am 30. November 1906 in Dittmannsdorf, Krs. Waldenburg/Schles. als Sohn des Pfarrers Theodor Arndt und seiner Ehefrau Ida geb. Drieschner geboren. Ich besuchte die Volksschule in Dittmannsdorf, danach das Städt. ev. Gymnasium in Waldenburg, wo ich Ostern 1928 die Reifeprüfung ablegte. Entgegen meiner ursprünglichen Neigung zur Elektrotechnik studierte ich, (veranlaßt durch die Zeitverhältnisse,) Naturwissenschaften, zunächst mit dem Ziel des Staatsexamens für das höhere Lehramt. Nach meinem 10. Semester entschloß ich mich jedoch, an der Universität Breslau, in Experimentalphysik zu promovieren. Herr Professor Schaefer stellte das in der vorliegenden Arbeit behandelte Thema. Ende 1936 konnten die experimentellen Untersuchungen abgeschlossen werden. Am 14. April 1937 bestand ich die mündliche Doktorprüfung.

Während meines Studiums an den Universitäten Breslau, Berlin und Tübingen hörte ich Vorlesungen bei den Herren Professoren: Schaefer, Bergmann, Senftleben, Fues, Reiche (Breslau), Planck (Berlin): Physik; Radon, Rademacher, Hoheisel (Breslau), Feigl (Berlin), Knopp (Tübingen): Mathematik; Biltz, Meyer (Breslau): Chemie. Allen meinen Lehrern möchte ich hier meinen aufrichtigen Dank aussprechen.

Herrn Professor Schaefer danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit und für die Bereitstellung der Institutsmittel; ebenso Herrn Professor Bergmann, der mir wiederholt seine reiche experimentelle Erfahrung zur Verfügung stellte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. v. Fragstein, der mir während der ganzen Arbeit jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand.